

Effect of treatments on high initial strength portland cement and mosso bamboo compatibility

Efecto de los tratamientos sobre la compatibilidad entre el bambu moso y el cemento portland de alta resistencia inicial

L. Cechin^{1*}, A. Matoski*, A. Miranda de Lima*, A. Monique Weber*, R. Basso Tokarski*

*Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, BRAZIL

Fecha de Recepción: 09/06/2017

Fecha de Aceptación: 17/10/2017

PAG 127-136

Abstract

The objective of this study was to evaluate the effect of six different types of treatment on mosso bamboo biomass (Phyllostachys pubescens) in order to verify its compatibility with Portland cement. The treatments adopted for mosso bamboo were: immersion in different solutions as to know: cold water, hot water, sodium hydroxide, sodium silicate, silane and calcium chloride. The degree of compatibility was determined through the study of the hydration heat rates in the first 24 hours and the compressive strength after 7 days of the bamboo-cement composites. The influence of the crystallinity of the fibers was analyzed using X-Ray Diffractometry. Results indicated that the addition of 4% calcium chloride to the blend is the most efficient treatment to decrease the species inhibitory capacity, while treating the raw material with sodium hydroxide adversely affected to the binder. The treatment with cold water presented the highest composite compressive strength and the treatment with silane presented the highest fiber crystallinity index.

Keywords: Vegetable Biomass, composites, compatibility, Mosso bamboo, treatments

Resumen

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de seis diferentes tipos de tratamiento sobre la biomasa de mosso bambú (*Phyllostachys pubescens*) con el fin de verificar su compatibilidad con el cemento Portland. Los tratamientos adoptados para mosso bambú fueron: inmersión en diferentes soluciones como saber: agua fría, agua caliente, hidróxido de sodio, silicato de sodio, silano y cloruro de calcio. El grado de compatibilidad se determinó mediante el estudio de las tasas de calor de hidratación en las primeras 24 horas y la resistencia a la compresión después de 7 días de los compuestos de bambú-cemento. La influencia de la cristalinidad de las fibras se analizó mediante difracción de rayos X. Los resultados indicaron que la adición de cloruro de calcio al 4% a la mezcla es el tratamiento más eficaz para disminuir la capacidad inhibidora de la especie, mientras que el tratamiento de la materia prima con hidróxido sódico se ve afectado adversamente al aglutinante. El tratamiento con agua fría presentó la resistencia compresiva compuesta más alta y el tratamiento con silano presentó el mayor índice de cristalinidad de la fibra.

Palabras clave: Biomasa Vegetal, compuestos, compatibilidad, bambú moso, tratamientos

1. Introducción

Los residuos producidos por la industria maderera constituyen una fuente importante de materia prima para la producción elementos constructivos, permitiendo su aplicación como refuerzo para la pasta de cemento. Este tipo de residuo ha creado un gran interés debido a su bajo costo, disponibilidad, ahorro energético además de ser una solución en lo que respecta a asuntos medioambientales. El uso de baldosas prefabricadas, paneles y otros elementos constructivos puede representar una contribución importante al crecimiento de la infraestructura en países en vías de desarrollo (Savastano junior y Santos, 2008).

El compuesto de cemento-madera es generado por la unión de las partículas o fibras de madera con pasta de cemento. La parte orgánica de la composición, es decir, la madera y las fibras también se pueden obtener de fibras agrícolas no madereras (como por ejemplo sisal, bambú y lino) y otros residuos lignocelulósicos (tales como bagazo, trigo, periódico, etc.) (Moslemi, 1997; Cheumani et al. 2011).

La mayor desventaja de utilizar estos compuestos es la interacción inadecuada entre la madera y el cemento. La madera es un material lignocelulósico y es susceptible a la

degradación en un ambiente con alta alcalinidad, como en la pasta de cemento (Moslemi, 1989). Substancias tales como las hemicelulosas, almidones, azúcares, fenoles, entre otros extractos pueden inhibir el proceso de hidratación del cemento.

Según Biblis y Lo (1968), dentro de los componentes orgánicos de la madera, los carbohidratos son los que tienen la mayor influencia negativa en el curado del cemento, la glucosa y la celulosa se consideran como los mayores inhibidores. En los grupos fenólicos, la lignina y los terpenos no presentan un efecto inhibitorio, mientras que los taninos, principalmente aquellos que son hidrolizados, tienen una gran influencia en la inhibición de la pasta de cemento, así como ácidos orgánicos de alto peso molecular, tales como los ácidos alifáticos.

La pasta de cemento hidratado tiene cuatro fases sólidas principales: silicato de calcio hidratado (C-S-H), hidróxido de calcio (portlandita), sulfoaluminatos de calcio y granos de clinker no hidratados. Los cristales de hidróxido de calcio (Ca (OH)) son responsables de la alta alcalinidad de la matriz de cemento, dando como resultado un pH de 12,5 (Senff et al., 2005).

Los componentes de la madera pueden ser degradados por el hidróxido de calcio formado durante la hidratación del cemento. Este ambiente alcalino es capaz de

¹ Autor de correspondencia:



remover parte de los extractos y disolver los componentes de la madera como las hemicelulosas, causando así cambios dimensionales en el compuesto de cemento-madera (MILLER; MOSLEMI, 1991; FAN et al., 1999).

Los carbohidratos de la madera reaccionan con cationes de hierro, calcio y aluminio, retardando la reacción de hidratación del cemento y reduciendo su cristalinidad y resistencia (Hachmi; Campbell, 1989). El agua presente en los poros de la matriz cementosa presenta un pH alto que puede romper los enlaces químicos de las fibras de la madera, permitiendo la migración de los extractos de la madera a la superficie de la pasta de cemento (Silva et al., 2009).

Según Miller y Moslemi (1991), algunas sustancias como las resinas y las grasas pueden migrar a la superficie de las partículas de la madera durante el proceso de secado y forman una capa hidrofóbica que reduce los enlaces de hidrógeno entre el cemento y la madera, que termina reduciendo la resistencia interfacial.

Hachmi y Moslemi (1989), descubrieron que los extractos de la madera son los principales responsables de la inhibición de la pasta de cemento, entre estos extractos hay resinas, ácidos grasos, terpenos, terpenoides, azúcares simples, sales, compuestos fenólicos y compuestos alifáticos. Según este nivel de compatibilidad entre el cemento y la madera, esta interacción se conoce como compatible o no compatible, es decir, si el proceso químico de endurecimiento del cemento no se altera o se altera en pequeña medida, se dice que son compatibles. Si la presencia de la madera afecta el endurecimiento del cemento, se dice que estos no son compatibles (Jorge et al., 2004).

La reacción de hidratación del cemento es exotérmica, es decir, cuando esta ocurre hay liberación de calor. Al medir el calor total liberado en el tiempo, es posible monitorear la hidratación del cemento, de modo que se puede utilizar este método para analizar la compatibilidad entre el cemento y la madera revisando su temperatura en las reacciones de hidratación (Hachmi y Moslemi, 1989; Hachmi et al., 1990).

Para resolver el problema de la inhibición, comúnmente se utilizan aditivos químicos o acelerantes en una solución diluida, adoptando pretratamientos para la madera, como extracción acuosa, extracción alcalina, uso de agentes bloqueadores y aglutinantes para disminuir las sustancias con contenido inhibitorio. Otras estrategias son el uso de preservantes de madera, mejorando el almacenamiento prolongado de la madera, el secado de la madera empleando el uso del cemento de alta resistencia inicial o cemento aluminoso, inyección de CO₂, etc. (Moslemi et al., 1983; Simatupang et al., 1988; Pehanich et al., 2004; Na et al., 2014).

Estos tratamientos tienen como objetivo la búsqueda de la eliminación de los componentes químicos que causan la inhibición de la pasta de cemento y al mismo tiempo, el aumento de la hidratación del cemento para neutralizar el efecto de retardo de la hidratación causado por la presencia de extractos de la madera (Na et al., 2014).

Para satisfacer la necesidad de materiales renovables, se han utilizado subproductos agrícolas tales como cascarillas de arroz, fibras de bambú, coco y sisal, minimizando de este modo el consumo de energía, conservando los recursos naturales, reduciendo la contaminación y manteniendo saludable el medioambiente. El bambú es un material que ofrece ventajas económicas ya que alcanza su completo

crecimiento en solo unos cuantos meses y su resistencia mecánica máxima en apenas unos años. Además, existe en abundancia en regiones tropicales y subtropicales del mundo (Ghavami, 2005).

El bambú está caracterizado como un recurso natural renovable, biodegradable y eficiente energéticamente y presenta un gran potencial para ser utilizado como material constructivo. Sin embargo, sus aplicaciones fueron limitadas debido a su inestabilidad dimensional, adhesivos inadecuados para su uso, conexiones difíciles debido a su forma irregular y un rápido deterioro debido a su constitución anatómica rica en almidón (YUSHUN et al., 2012).

Su uso en compuestos tiene ventajas en términos del aumento de las propiedades de resistencia, elasticidad y estabilidad dimensional. En países de Asia es ampliamente utilizado para la construcción de viviendas, la fabricación de muebles y utensilios para la vida diaria debido a su alta resistencia, la dureza de su superficie y su flexibilidad (HIZIROGLU et al., 2005; SUMARDI et al., 2007; OBATAYA et al., 2007).

El objetivo principal de esta investigación es analizar la compatibilidad entre el cemento Portland y la biomasa de bambú moso (*Phyllostachys pubescens*), analizando los efectos de los tratamientos en la compatibilidad del bambú y el cemento.

2. Materiales y Métodos

2.1 Materiales

La biomasa de bambú moso (*Phyllostachys pubescens* Mazel ex J.Houz) fue utilizada como materia prima. Las partículas de bambú moso fueron donadas por una empresa ubicada en la ciudad de São José dos Pinhais (Paraná, Brasil). Luego de que este material es recibido en la empresa, es transformado en partículas con la ayuda de molinos de martillos, tras lo cual ocurre la clasificación de su granulometría. El tamaño máximo de las partículas es de 1,18 mm según ASTM C 136/1 (2001).

El aglutinante utilizado fue el cemento Portland de alta Resistencia inicial - CPV-ARI, que fue escogido debido a que su tiempo de fraguado inicial es más rápido que los otros cementos Portland y a que alcanza altos niveles de resistencia en los primeros días después de su aplicación.

Con el fin de analizar el efecto de los tratamientos en la hidratación del cemento CPV-ARI, se aplicaron seis tratamientos a la biomasa de bambú moso. Estos tratamientos se adoptaron basándose en la literatura (Castro et al., 2014; Na et al., 2014; Jorge et al., 2004; Pehanich et al., 2004).

- Remojo en hidróxido de sodio (NaOH), silicato de sodio y silano, en el cual la biomasa se mantuvo inmersa en solución diluida al 1 %, por un periodo de una hora, luego de lo cual las partículas de bambú fueron enjuagadas en agua fría y después secadas a temperatura ambiente.
- Solubilización en agua fría, en la cual la biomasa se mantuvo inmersa en agua fría por 48 horas, después de ese período fue secada a temperatura ambiente (Castro et al., 2014; Pehanich et al., 2004).
- Solubilización en agua caliente, en la cual la biomasa se mantuvo inmersa en agua a 100° C por 3 horas, después de ese período fue secada a

temperatura ambiente (Castro et al., 2014; Pehanich et al., 2004).

- Uso de un aditivo acelerante a base de cloruro de calcio con 4 % de contenido, que se añadió a la mezcla de compuestos hecha con la biomasa *in natura* (Jorge et al., 2004;).

Para evaluar el calor de hidratación del cemento Portland con y sin biomasa de bambú moso, según Hachmi et al. (1990), se utilizó la adaptación de un calorímetro como un dispositivo de adquisición de datos para un sensor de termopar tipo K (níquel - cromo) de 8 canales ANSI 2 x 24 (0,51mm) AWG en silicona WARME Master Logger A 202.

Para analizar los efectos de los tratamientos en la cristalinidad de las fibras de bambú moso, según Segal et al. (1959), el índice de cristalinidad de las fibras está directamente relacionado con las propiedades mecánicas de los compuestos, por lo que mientras más cristalina sea la fibra con un índice más cercano al 100%, mejor será su rendimiento si se usa como refuerzo en paneles de cemento-madera (Hy y Hsieh, 2001).

2.2 Método

2.2.1 Caracterización química del bambú moso

Esta biomasa de bambú moso se caracterizó químicamente utilizando las recomendaciones de la Asociación Técnica de la Industria del Papel y la Pulpa (del inglés Technical Association of Pulp and Paper Industry, TAPPI). Respecto a la solubilidad en agua fría y caliente (TAPPI T 207 cm, 1999), hidróxido de sodio (TAPPI T 212 om, 2002a), extractos totales (TAPPI T 204 cm, 1997), lignina (TAPPI T 222 om, 2006), cenizas (TAPPI T 211 cm, 2002b), humedad (TAPPI T 264 cm, 2008) y pH (TAPPI T 252 om, 2002c).

2.2.2 Índice de compatibilidad

Con el fin de evaluar el calor de hidratación del cemento Portland cuando es mezclado con la biomasa de bambú moso, se hicieron moldes utilizando mezclas de lechada de cemento Portland con agua: relación cemento (w/c) de 0,4 y cemento: y compuestos de cemento-madera (w/c) de 1:13 y w/c de 0,4. Además en una de las mezclas del compuesto con bambú *in natura*, se agregó un 4 % de cloruro de calcio.

Las mezclas se colocaron dentro del calorímetro en donde el cable de compensación tipo K2x24 con aislamiento de silicona fue introducido dentro de la mezcla. El cable de compensación fue conectado a un receptor de señales en donde se obtuvieron los datos, los cuales fueron convertidos a valores de temperatura mediante un programa de computadora. Cada segundo se recolectaron las lecturas durante un periodo de 24 horas. Se realizaron tres réplicas para cada mezcla.

A partir de las curvas de hidratación fue posible determinar la temperatura máxima alcanzada por cada mezcla, el tiempo en que se alcanzó esta temperatura y la tasa máxima de variación de la temperatura en el tiempo, permitiendo así determinar el índice de compatibilidad para el bambú moso con y sin tratamiento. Los resultados fueron analizados estadísticamente utilizando la prueba de comparación de medias múltiples de Tukey al 95 % de probabilidad.

Para el cálculo del índice de compatibilidad, se utilizó la ecuación elaborada por Hofstrand et al. (1984) que considera las temperaturas máximas de la reacción de hidratación de mezclas que contienen o no las partículas de bambú y también considera las tasas máximas de variación de la temperatura en el tiempo, tal como se indica en la Ecuación [1]:

$$I = \left[\left(\frac{t_2 - t_2'}{t_2} \right) \left(\frac{T_2 - T_2'}{T_2} \right) \left(\frac{S - S'}{S} \right) \right] * 100 \quad (1)$$

Donde:

t_2 : tiempo para alcanzar la temperatura máxima (cemento-madera-agua);

T_2 : temperatura máxima de hidratación (cemento-madera-agua);

S : tasa máxima de variación de temperatura en el tiempo (cemento-madera-agua);

t_2' : tiempo para alcanzar la temperatura máxima (pasta);

T_2' : temperatura máxima de hidratación (pasta),

S' : tasa máxima de cambio de temperatura en el tiempo (pasta).

Según la Ecuación, la madera puede clasificarse en cuatro categorías, según la Tabla 1 (Okino et al., 2004; Nasser et al., 2016).

Tabla 1. Clasificación de la inhibición de hidratación del cemento según el índice de inhibición

Índice de inhibición (%)	Clasificación
$I < 10$	Inhibición baja
$I = 10 - 50$	Inhibición moderada
$I = 50 - 100$	Inhibición alta
$I > 100$	Inhibición extrema



2.2.3 Resistencia a la compresión

Para analizar los efectos de los tratamientos en la biomasa de bambú moso, se seleccionó un espécimen de ensayo cilíndrico con una relación de 1: 13: 0,4 (cemento: partículas de bambú: agua) para los compuestos y una pasta de referencia con una relación de 1:0,4 (cemento: agua). Los especímenes de ensayo cilíndricos se moldearon con un diámetro interno de 50 mm y una altura de 100 mm. El mortero fue colocado en el molde y dividido en cuatro capas de la misma altura, cada capa agregada fue engrosada con treinta sopladors de anclaje (ASTM C 39, 2001). Después del moldeado, los especímenes fueron curados en una cámara húmeda (temperatura de 23° C y una humedad relativa de > 95 % RH) por 7 días. Para la resistencia a la compresión se utilizó una máquina de ensayos universal con adquisición de datos por computadora, el espécimen, debidamente tapado con piezas de neopreno acompañadas de cascos de acero, fue colocada en el plato inferior de la prensa de modo que estuviera completamente centrada en el eje de carga. Luego de esto, se transmitió la carga de compresión a los especímenes. La resistencia a la compresión de los compuestos se midió cuadruplicada y los resultados fueron analizados estadísticamente utilizando la prueba de comparación de medias múltiples de Tukey, al 95 % de probabilidad.

2.2.4 Índice de cristalinidad

El índice de cristalinidad se obtuvo por medio del método de difracción de rayos X establecido por Segal et al. (1959). Este es un proceso empírico que utiliza técnicas de ajuste y transmisión, midiendo la intensidad de interferencia

en el plano cristalino 002 y la dispersión amorfa. El índice de cristalinidad está dado por la Ecuación (2).

$$c = \left(\frac{I_{002} - I_{am}}{I_{002}} \right) * 100 \quad (2)$$

En la que:

Ic: índice de cristalinidad;

Iam: intensidad de la difracción mínima relacionada con la parte amorfa ($2\theta = 18,8^\circ$), y

I002: intensidad de la difracción máxima relacionada con la parte cristalina ($2\theta = 22,4^\circ$).

Para el análisis de difracción de rayos X, la muestra fue tamizada y luego la fracción más fina del grano fue sujeta a un haz de rayos X con un difractor de rayos X Shimadzu XRD-7000, utilizando un tubo de radiación de Cu-K α (40 kV, 30 mA), con un ángulo de difracción de (2θ) que varía de 15° a 25°, como se indica en la literatura.

3. Resultados

3.1 Caracterización química del bambú moso

La Tabla 2 presenta la caracterización química de la biomasa de bambú moso.

Tabla 2. Caracterización química del bambú moso

Prueba	Valor observado
Solubilidad en agua fría (%)	2,32
Solubilidad en agua caliente (%)	3,93
Solubilidad en NaOH (%)	20,30
Extractos totales (%)	4,27
Lignina (%)	46,63
Cenizas (%)	2,24
Humedad (%)	10,93
pH (2h)	9,0
pH (24h)	9,3
* Valores medios para tres repeticiones	

Basándonos en los resultados presentados, se puede observar que la solubilidad en NaOH eliminó un porcentaje más alto de sustancias de biomasa, esto se debe al hecho de que la solución de hidróxido de sodio no solo elimina los extractos presentes en la madera sino que también otros componentes tales como la celulosa degradada y hemicelulosas.

También se muestra que esta especie no presenta un contenido significativo de extractos totales, siendo esto un factor clave para la compatibilidad entre el cemento y la biomasa. Por lo tanto, cuanto mayor sea el contenido de extractos, mayor será la incompatibilidad entre el cemento y el material lignocelulósico.

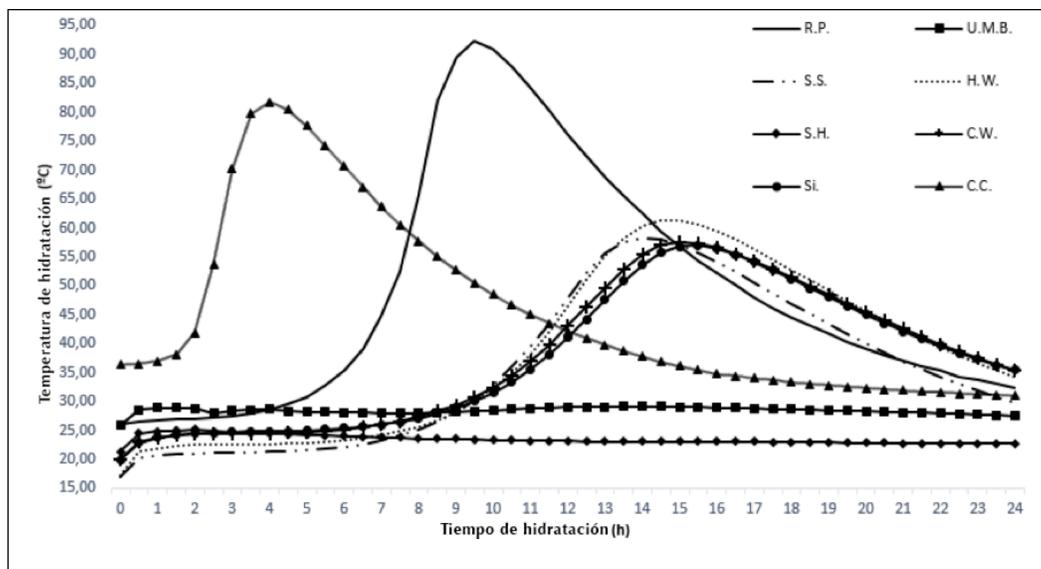
El bambú moso presenta un alto contenido de ceniza (material orgánico) en su composición y este alto contenido puede afectar el proceso de hidratación del cemento. Según Yu (2007), el bambú presenta en promedio 2-3 % de sílice en

su composición, que reacciona con el hidróxido de calcio presente en la matriz de cemento, formando una cantidad extra de silicato de calcio hidratado y, por consiguiente, disminuyendo la alcalinidad del compuesto (BIRICIK et al., 1999).

También se observa que la biomasa muestra pH alcalino, es decir, la naturaleza de sus extractos es alcalina. Según Hachmi y Moslemi (1990), los extractos alcalinos tienden a reaccionar con el hidróxido de calcio presente en la matriz de cemento y forman complejos permanentes con este, no permitiendo que alcance el tamaño de núcleo necesario para la cristalinización del cemento.

3.2 Índice de compatibilidad

Las curvas de hidratación de las pruebas de inhibición se muestran en la Figura 1.



R.P.: Pasta de referencia; S.S.: Silicato de sodio; S.H.: Hidróxido de sodio; Si.: Silano; U.M.B.: Bambú moso sin tratar; H.W.: Agua caliente; C.W.: Agua fría; C.C.: 4% de cloruro de calcio.

Figura 1. Curvas de hidratación para la pasta de referencia y los compuestos de bambú moso

Los tratamientos hechos con agua caliente, silicato de sodio, agua fría y silano fueron aquellos que pudieron elevar la temperatura máxima de hidratación del cemento en comparación con el compuesto hecho con el bambú sin tratar.

El hidróxido de sodio afectó negativamente la temperatura de hidratación del cemento en comparación con el compuesto de partículas de bambú sin tratar. Además, se puede ver que el 4 % de adición de cloruro de calcio fue el



tratamiento que más se acercó a la temperatura de hidratación de la pasta de referencia.

La Tabla 3 muestra la temperatura máxima de hidratación, el tiempo en que esta temperatura se alcanzó, el

índice de compatibilidad al igual que su clasificación en términos de compatibilidad con el cemento.

Tabla 3. Valores promedio de temperatura, tiempo e índice de compatibilidad para los compuestos de bambú moso

	Temperatura máxima (°C)	Tiempo (h)	I (%)	Índice de inhibición
Pasta de referencia	92,33 ^c	9,5 ^c	-	-
Bambú moso sin tratar	29,13 ^c	14,0 ^c	31,77 ^c	Inhibición baja
Hidróxido de sodio	25,13 ^c	2,0 ^c	57,65 ^c	Inhibición alta
Silicato de sodio	58,30 ^c	14,0 ^c	9,62 ^c	Inhibición baja
Agua fría	57,33 ^c	15,5 ^c	16,42 ^c	Inhibición moderada
Agua caliente	61,30 ^c	15,0 ^c	11,65 ^c	Inhibición moderada
Silano	57,00 ^c	15,5 ^c	17,17 ^c	Inhibición moderada
Adición de 4 % de cloruro de calcio	81,40 ^c	4,0 ^c	5,44 ^c	Inhibición baja
*Valores medios para tres repeticiones				
**Las medias seguidas por la misma letra no difieren entre ellas, según la prueba de Tukey al 95 % de probabilidad.				

Basándose en los índices de compatibilidad, se verificó que el tratamiento que aumentó de manera significativa la compatibilidad entre el cemento CPV-ARI y las partículas de bambú fue el realizado con silicato de sodio, seguido por el de agua caliente, agua fría y silano. El tratamiento con hidróxido de sodio (NaOH), incrementó fuertemente la incompatibilidad entre el cemento y las partículas de bambú.

En el caso de la adición del cloruro de calcio a la mezcla, se observó que hubo una mejora significativa en el índice de compatibilidad, que casi se acercó a la temperatura máxima de hidratación de la pasta de cemento de referencia.

La prueba de Tukey al 95 % ($\alpha = 0,05$) de fiabilidad se realizó para comparar estadísticamente la influencia de los tratamientos en la temperatura de hidratación del cemento. De este modo, se puede afirmar que los tratamientos realizados aplicados a la biomasa fueron un factor significativo para el aumento de la temperatura de hidratación de las mezclas de CPV-ARI.

3.3 Resistencia a la compresión

La Tabla 4 muestra los valores promedio de la resistencia a la compresión de los compuestos y la pasta de referencia.

Tabla 4. Valores medios de resistencia a la compresión luego de siete días

	Relación (cemento: partículas de bambú: agua)	Resistencia a la compresión (MPa)
Pasta de referencia	1: 0: 0,4	44,66 ^c
Compuesto de bambú moso sin tratar	1: 13: 0,4	11,65 ^c
Hidróxido de sodio	1: 13: 0,4	13,50 ^c
Silicato de sodio	1: 13: 0,4	17,18 ^c
Agua caliente	1: 13: 0,4	16,28 ^c
Agua fría	1: 13: 0,4	19,49 ^c
Silano	1: 13: 0,4	17,55 ^c
Compuesto de bambú moso sin tratar y adición de 3 % de cloruro de calcio	1: 13: 0,4	18,49 ^c
*Valores medios para cuatro repeticiones.		
** Las medias seguidas por la misma letra no difieren entre ellas, según la prueba de Tukey al 95 % de probabilidad.		

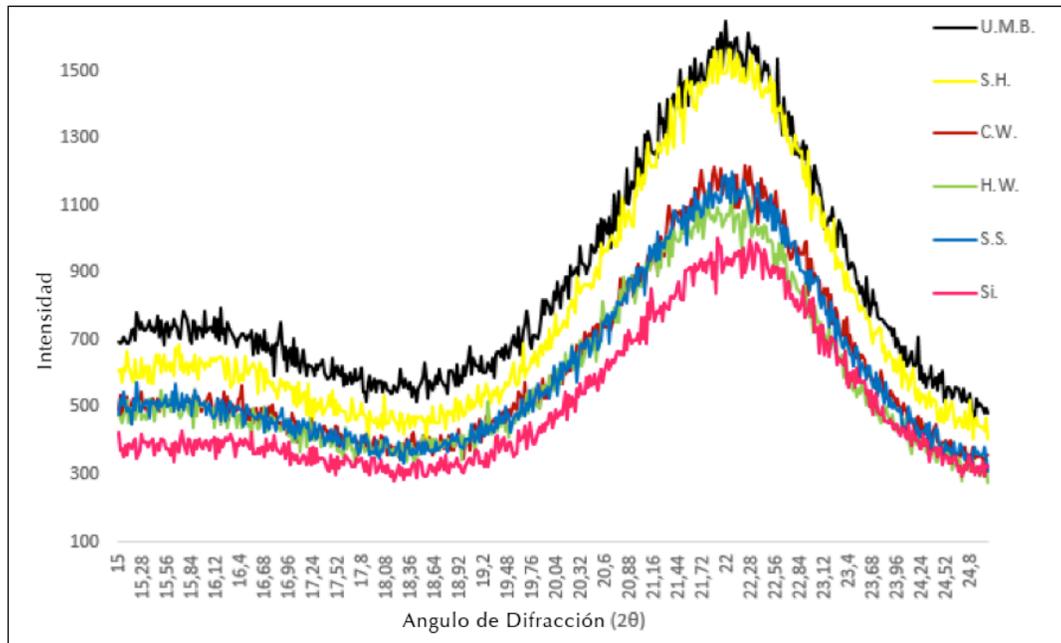
En cuanto a los tratamientos adoptados, se observó que todos aumentaron la resistencia a la compresión de los compuestos en comparación con aquellos en que el compuesto fue hecho con bambú sin tratar.

La prueba de Tukey al 95 % ($\alpha = 0.05$) de fiabilidad se llevó a cabo para comparar estadísticamente la influencia de los tratamientos en la resistencia a la compresión. Se puede afirmar que los tratamientos a las partículas de bambú fueron

determinantes para el aumento de la resistencia a la compresión de los compuestos. El tratamiento con agua fría es el que más aumentó la resistencia a la compresión de las partículas.

3.4 Índice de cristalinidad

La Figura 2 presenta el difractor de rayos X para los distintos tratamientos realizados en las fibras de bambú.



U.M.B.: Bambú moso sin tratar; S.H.: Hidróxido de sodio; C.W.: Agua fría; H.W.: Agua caliente; S.S.: Silicato de sodio; Si: Silano.

Figura 2. Difractor de rayos X para los distintos pretratamientos aplicados a la fibra de bambú moso

La Tabla 5 presenta los valores del índice de cristalinidad para los distintos tratamientos

realizados a las partículas de bambú moso.

Tabla 5. Índice de cristalinidad para el bambú moso

	Índice de cristalinidad (%)
Bambú moso sin tratar	58,63
Hidróxido de sodio	65,59
Silicato de sodio	64,02
Agua caliente	63,32
Agua fría	64,80
Silano	68,13

Todos los tratamientos realizados a las partículas de bambú moso aumentaron la cristalinidad de la fibra. Entre los tratamientos, aquellos con silano permitieron obtener el índice de cristalinidad más alto, aumentándolo en un 16 %. Esto ocurrió porque el silano actúa como un agente de acoplamiento en la fibra, modificando su interfaz y haciéndola más cristalina.

El índice de cristalinidad de la fibra puede estar relacionada con la resistencia a la compresión del compuesto hecho con partículas de bambú tratadas con silano, ya que presenta la tercera mayor resistencia a la compresión.

Por el contrario, el tratamiento con agua caliente fue el que tuvo menos influencia en el índice de cristalinidad, aumentándolo en un 8 %. Además, también fue posible verificar una correlación entre la resistencia a la compresión



de los compuestos de bambú tratados con agua caliente y el índice de cristalinidad, ya que estos alcanzaron quinta tasa más baja de resistencia a la compresión.

4. Discusión

Como se ha informado, la composición química de la biomasa altera el proceso de hidratación del cemento. Sin embargo, las partículas de bambú no poseen un alto contenido de extractos y presentan una gran cantidad de ceniza en su composición.

Según la prueba de inhibición, se puede observar que el tratamiento con hidróxido de sodio afectó negativamente la temperatura de hidratación y el índice de compatibilidad del compuesto, disminuyendo la compatibilidad en un 18 % en comparación con el compuesto de referencia. Esto se debe al hecho de que la solución de hidróxido de sodio no solo elimina los extractos de la madera, sino que también elimina otros compuestos tales como la celulosa y las hemicelulosas, influyendo así en la hidratación del cemento. También se observa que este tratamiento demoró el tiempo de fraguado del cemento en comparación con el compuesto hecho con partículas de bambú sin tratar.

El tratamiento con silano mostró un aumento de la compatibilidad de un 86 % entre el cemento y las partículas de bambú, actuando como un agente aglutinante entre el cemento y la biomasa, aumentando así el calor de hidratación del cemento. En cuanto al tratamiento con silicato de sodio, este actúa como un agente bloqueador sobre las partículas de bambú.

El pretratamiento realizado con agua fría remueve los componentes orgánicos, taninos, gomas y azúcares, y el pretratamiento con agua caliente, además de estos componentes, elimina el almidón, los cuales afectan el proceso de hidratación del cemento. De este modo, el tratamiento con agua caliente se vuelve más eficaz para aumentar la compatibilidad entre las partículas de bambú moso y el cemento Portland, ya que este elimina el almidón presente en las partículas de bambú moso.

Los tratamientos con agua caliente y fría, en comparación con el compuesto con partículas de bambú sin tratar, demostraron ser útiles para aumentar la compatibilidad en 63 % y 48 %, respectivamente.

En el caso de los compuestos con la adición de 4 % de cloruro de calcio, esto aumenta la compatibilidad entre las partículas de bambú vegetal y el cemento. Esto ocurre debido al hecho de que el cloruro de calcio actúa como un catalizador para la mezcla, acelerando las reacciones de hidratación del cemento y previniendo demoras en el proceso de hidratación de la biomasa para afectar este proceso.

El tratamiento con silicato de sodio igualó el tiempo de hidratación de la pasta de referencia en comparación con el compuesto con partículas de bambú sin tratar. Los tratamientos con agua fría y silano aumentaron el fraguado en un 10 % y los con agua caliente lo aumentaron en un 7 % en comparación con el compuesto con partículas de bambú sin tratar.

En todos los tratamientos mejoró la resistencia a la compresión en comparación con las partículas de bambú sin tratar: el silicato de sodio la aumentó en un 83 %, el agua caliente en un 74 %, el agua fría en un 108 % y el silano en un 87 %. Incluso el tratamiento con el hidróxido de sodio, el cual no alcanzó resultados satisfactorios en cuanto a al índice de compatibilidad, aumentó la resistencia a la compresión en un 44 %.

Es notable la influencia del sílice presente en la composición química del bambú, ya que reacciona con el hidróxido de calcio presente en la matriz de cemento, formando una cantidad extra de silicato de calcio hidratado, que es el principal responsable del aumento de la resistencia a la compresión del compuesto.

En todos los tratamientos aplicados a las partículas de bambú, aumentó el índice de cristalinidad. Los pretratamientos aplicados a las partículas de bambú fueron eficaces para la remoción de sus extractos amorfos, aumentando su cristalinidad. El pretratamiento con silano fue el más eficaz con 68,13.

5. Conclusiones

Las partículas de bambú moso pueden utilizarse en la producción de cemento-madera, ya que el tratamiento con agua fría utilizado aumentó la resistencia a la compresión axial en un 108 % en comparación con las referencias.

El tratamiento con 1 % de silicato de sodio y agua caliente fue satisfactorio con respecto al índice de compatibilidad entre las partículas de bambú y el cemento, aumentando este índice en un 69 % y un 63 %, respectivamente.

La adición de un 4 % de cloruro de calcio en la mezcla permitió una mejora significativa en la compatibilidad del cemento y las partículas de bambú, aumentando el índice de compatibilidad en un 82 % y elevando la temperatura de hidratación del compuesto en un 180 % en comparación con la referencia. También verificamos que el aumento de la compatibilidad tuvo una influencia significativa en las propiedades mecánicas de este compuesto, que es una característica positiva y deseable para su uso en construcción.

Los tratamientos aplicados a las partículas de bambú moso aumentaron la resistencia a la compresión de los compuestos. La temperatura de hidratación de la pasta de CPV-ARI y el índice de cristalinidad de la fibra también mejoraron en comparación con el compuesto de referencia hecho con bambú sin tratar.

Por lo tanto, se puede concluir que las partículas de bambú moso presentan características adecuadas para su uso en compuestos de cemento-madera. Todos los pretratamientos aplicados a las partículas de bambú mejoran la compatibilidad, la resistencia a la compresión y la cristalinidad de los compuestos.

6. Agradecimientos

Los autores desean agradecer a Fundação Araucária y a CAPES por su apoyo.



7. Referencias

- ASTM - American society for testing materials (2001a)**, ASTM C 39: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens (ASTM).
- ASTM - American society for testing materials (2001b)**, ASTM C 136/1: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates (ASTM).
- Biricik H., Akoz F., Berkay I., Tulgar A.N. (1999)**, Study of pozzolanic properties of wheat straw ash. *Cement and Concrete Research*, 29: 637-643.
- Biblis E.J., Lo C. (1968)**, Sugar and other wood extractives: effect on the setting of southern pine-cement Mixtures. *Forest Products Journal*, 18 (8): 28-34.
- Castro V. G., Araújo R. D., Parchen C., Iwakiri S. (2014)**, Avaliação dos efeitos de pré-tratamentos da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden & cambage no grau de compatibilidade com cimento portland. *Revista Árvore*. 38: 935-942.
- Cheumani Y., Ndikontar M., Jéso B., Sébe G. (2011)**, Probing of wood-cement interactions during hydration of wood-cement composites by proton low-field NMR relaxometry. *Journal of Materials Science*, 46 (5): 1167-1175.
- Fan M.Z., Bonfield P.W., Dinwoodie J.M., Breese M.C. (1999)**, Dimensional instability of cement-bonded particleboard: Mechanisms of deformation of CBPB. *Cement and Concrete Research*, 29 (6): 923-932. ISSN 00088846. [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00076-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00076-9).
- Ghavami K. (2005)**, Bamboo as reinforcement in structural concrete elements. *Cement and Concrete Composites*. 27: 637-649. ISSN 0958-9465. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.06.002>.
- Hachmi M.H., Moslemi A.A. (1990)**, Effect of wood pH and buffering capacity on wood-cement compatibility. *Holzforschung - International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood*. 44: 425 – 430.
- Hachmi M.H., Campbell A.G., Moslemi A.A. (1990)**, A new technique to classify the compatibility of wood with cement. *Wood Science and Technology*. 24: 345-354.
- Hachmi, M.H.; Moslemi, A.A. (1989)**. Correlation between wood-cement compatibility and wood extractives. *Forest Products Journal*. 39: 55–58.
- Hiziroglu S., Jarusombuti S., Fueangvivat V., Bauchongkol P., Soontonbura, W., Darapak T. (2005)**, Properties of bamboo-rice straw-eucalyptus composite panels. *Forest Products Journal*. 55: 221-225.
- Hofstrand A.D., Moslemi A.A., Garcia J.F. (1984)**, Curing characteristics of wood particles from nine northern Rocky Mountain species mixed with Portland cement. *Forest Products Journal*, 34: 57-61.
- Hu X. P., Hsieh Y. L. (2001)**, Effects of dehydration on the crystalline structure and strength of developing cotton fibers. *Textile Research Journal*. 71: 231-239.
- Jorge F.C., Pereira C., Ferreira J.M.F. (2004)**, Wood-cement composites: a review. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 62 (5). October 2004. p.370-377. DOI: 10.1007/s00107004-0501-2.
- Miller D.P., Moslemi A.A.** Wood-cement composites: effect of model compounds on hydration characteristics and tensile strength. *Wood Fiber Science*, 23 (4): 472–482.
- Moslemi A.A. (1997)**, Inorganic-bonded wood and fiber composite materials. *Forest Products Research Society*. 5: 162 p.
- Moslemi A.A. (1989)**, Wood-cement panel products: coming of age. In: 1st Inorganic Bonded Fiber Composites Symposium. *Forest Products Research Society. Proceedings, USA*. p.12-18.
- Moslemi A.A., Garcia J.F., Hofstrand A.D. (1983)**, Effect of various treatments and additives on wood-Portland cement-water systems. *Wood and Fiber Science*, 15 (2): 164-176.
- Na B., Wang Z., Wang H., Lu X. (2014)**, Wood-cement compatibility review. *Wood Research*, 59 (5): 813-826.
- Nasser R. A., Salem M. Z., Al-Mefarrej H. A., Aref I. M. (2016)**, Use of tree pruning wastes for manufacturing of wood reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 72: 246-256. ISSN 0958-9465, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.06.008>.
- Obataya E., Kitin P., Yamauchi H. (2007)**, Bending characteristics of bamboo (*Phyllostachys pubescens*) with respect to its fiber-foam composite structure. *Wood science and technology*. 41: 385-400.
- Okino E. Y. A., Souza M. R., Santana M. A. E., Alves M. V. S., Sousa M. E., Teixeira D. E. (2004)**, Cement-bonded wood particleboard with a mixture of eucalypt and rubberwood. *Cement and Concrete Composites*, 26 (6): 729-734. ISSN 0958-9465, [http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00061-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00061-1).
- Pehanich J.L., Blankenhorn P.R., Silsbee, M.R. (2004)**, Wood fiber surface treatment level effects on selected mechanical properties of wood fiber-cement composites. *Cement and Concrete Research*, 34 (1): 59-65. ISSN 0008-8846. [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00193-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00193-5).
- Savastano Junior H., Santos S. (2008)**, O Uso de Resíduos de Fibra Vegetal em Construção. *Como Ciência*. São Paulo – SP. p.1.
- Senff L., Folgueras M. V., Hotza D. (2005)**, Hidratação do cimento CP V ARI-RS: Influência da água nas reações de hidratação. In: *Congresso Brasileiro de Cerâmica*. 49: 1-12.
- Segal L., Creely J.J., Martin A.E., Conrad C. M. (1959)**, An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the x – ray diffractometer. *Textile Research Journal*, 29 (10): 786-794.
- Silva A.C., Savastano Junior H., John V. M. (2009)**, Envelhecimento de compósitos à base de escória de alto-forno reforçados com polpa celulósica residual de eucalipto. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, 9 (1): 25-44.
- Simatupang M. H., Lange H., Kasim A., Sedding N. (1988)**, Influence of wood species on the cement and gypsum. *International Congress on Fiber and Particleboard with Inorganic Binder*. Idaho. *Proceedings*. p.33-42.
- Sumardi I., Ono K., Suzuki S. (2007)**, Effect of board density and layer structure on the mechanical properties of bamboo oriented strand board. *Journal of wood science*. 53: 510-515.
- TAPPI - Technical association of the pulp and paper industry (1999)**, TAPPI T 207 cm – Water solubility of wood and pulp. (TAPPI).
- TAPPI - Technical association of the pulp and paper industry (2002a)**, TAPPI T 212 om – One percent sodium hydroxide solubility of wood and pulp. (TAPPI).
- TAPPI - Technical association of the pulp and paper industry (1997)**, TAPPI T 204 cm – Solvent extractives of wood and pulp. (TAPPI).
- TAPPI - Technical association of the pulp and paper industry (2006)**, TAPPI T 222 om – Acid-insoluble lignin in wood and pulp. (TAPPI).
- TAPPI - Technical association of the pulp and paper industry (2002b)**, TAPPI T 211 om – Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C. (TAPPI).
- TAPPI - Technical association of the pulp and paper industry (2008)**, TAPPI T 550 cm – Determination of equilibrium moisture in pulp, paper



and paperboard for chemical analysis. (TAPPI).

TAPPI - Technical association of the pulp and paper industry (2002c), TAPPI T 252 om – pH and electrical conductivity of hot water extracts of pulp, paper, and paperboard. (TAPPI).

Yu, X. Bamboo: Structure and Culture. (2007), 187 p. Thesis (Doctorate degree) - Fachbereich Kunst und Design, Universität Duisburg, Essen.

Yushun L., Huangying S., Wei S., Tianshi H. (2012), Flexural behavior of lightweight bamboo–steel composite slabs. *Thin-Walled Structures*. 53: 83-90. ISSN 0263-8231, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2012.01.001>.

